

Peningkatan Karakteristik Aspal Menggunakan Bahan Tambah Nano Fly Ash

Firda Jelita Mulyawati 1), Witri Siti Hanifah 2), Siegfried Syafier 3)

1,2 Universitas Langlangbuana, Jl. Karapitan No.116, Bandung 40261, Jawa Barat. Telepon:
(022) 4218084. Faks.: (022) 4237144 Bandung, Jawa Barat

3Jurusan sipil, FTEKNIK UNLA, Bandung

e-mail: *1Jelitafirda14@gmail.com, 2witrish220@gmail.com, 3siegfried.syafier@gmail.com

Abstract

Asphalt is a primary component in road pavement construction. Optimizing the utilization of industrial waste, such as fly ash from coal-fired power plants, is increasingly important as the number of companies using coal as fuel continues to grow. Although fly ash is widely used, applying nano fly ash as an asphalt additive remains limited. This study aims to evaluate the effectiveness of nano fly ash as an additive to improve the characteristics of asphalt. The research follows an experimental method conducted entirely in a laboratory setting. Testing was based on the 2018 Bina Marga Technical Specifications, with procedures aligned to AASHTO, ASTM, and SNI standards to ensure accurate and reliable results. Nano fly ash was added to Pen 60/70 asphalt in variations of 0%, 1%, 2%, and 2.5%. Each asphalt sample underwent parameter tests, including stability, flow, density, and stiffness. Results showed that the 1% addition provided the best outcomes, meeting all specified standards and demonstrating improved asphalt characteristics across multiple parameters. Variations of 2% and 2.5% yielded fewer compliant parameters, suggesting diminishing returns at higher nano fly ash levels. These findings indicate that nano fly ash can be a viable additive for Pen 60/70 asphalt, with a recommended optimal use of 1%. Further studies on economic viability and scalability are suggested to enhance the practical application of this material.

Keywords— Pen 60/70 Asphalt, Nano Fly Ash Additive, Road Pavement Improvement, Industrial Waste Utilization

PENDAHULUAN

Fasilitas transportasi darat yang sangat berguna merupakan pengertian dari jalan. Transportasi membantu banyak hal di Indonesia, terutama perekonomian. Pelayanan jalan yang baik, stabil, nyaman dan tahan lama merupakan kebutuhan umum [11] Aspal merupakan material utama permukaan jalan. Seiring berjalannya waktu, tenaga manusia menjadi lebih banyak khususnya pada transportasi darat yang digunakan masyarakat. Aspal, yang merupakan bahan kimia utama hidrokarbon, adalah produk eksplorasi yang berwarna hitam dan berbentuk cair hingga plastis. Tidak dapat larut dalam air, asam encer, atau larutan alkali; namun, sebagian besar larut dalam chloroform, aether, dan CS₂ bensol [9]. Oleh karena itu, untuk menunjang kelancaran pergerakan suatu daerah transportasi menuju suatu daerah tertentu, diperlukan fasilitas yang lebih baik dan berkualitas agar kualitasnya juga lebih baik [12]. Aspal sangat cocok untuk perkerasan jalan karena sifat viskoelastisnya, yang menunjukkan bahwa aspal dapat leleh di temperatur tinggi serta padat di temperatur rendah [10].

Bahan yang digunakan saat melakukan pengujian ini yaitu Nano Fly Ash yang dimana sisaan padat pada PLTU. Abu terbang batu bara dapat berdampak negatif pada lingkungan dan

kesehatan manusia jika dalam pengelolaannya tidak baik. Maka, pengelolaan dan penanganan yang tepat harus dilakukan guna mengurangi resiko dampak negatif tersebut. 25 (PP No. 85 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun) (Basria, Ningrum, & Adi, 2024) [18] Fly Ash merupakan bahan yang bersifat pozzolan, bahan ini merupakan salah satu bahan yang mengandung silika dan alumunium [13].

Dilihat pada potensi Fly Ash yang di hasilkan dari PLTU patut diperhatikan karena masih belum banyak digunakan untuk pemanfaatan pada aspal dan juga semakin banyak industri menggunakan abu batubara yang dipakai sebagai bahan baku dalam rangka menaikkan nilai guna dan tambah limbah industri. Pemanfaatan Nano Fly Ash pada aspal belum banyak digunakan atau dikaji. Peneliti sedang mencari solusi untuk masalah di atas sehingga Fly Ash dapat digunakan sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan sifatnya. Batu bara sisa dari pembakaran pabrik dan industri telah digunakan dalam penelitian sebelumnya.

Menurut Spesifikasi Teknik Jalan Bebas Hambatan dan Jalan Tol tahun 2020, penelitian yang dilakukan oleh [14] dengan judul Penambahan Abu Batu Bara PLTU Sebagai Filler Aspal AC WC menggunakan variasi tambahan abu batu bara 0%, 1%, 2%, dan 3% dilakukan. Hasil pada penelitiannya menyatakan bahwa abu batu bara (Fly Ash) dari PLTU Tanjung Enim ditambahkan sebesar 2% ke campuran aspal AC WC. Ini sebanding dengan Spesifikasi Teknis Jalan Bebas Hambatan dan Jalan dan juga mengembangkan pemanfaatan Fly Ash yang selama ini terbuang dan juga bisa dijadikan sebagai bahan yang bisa bermanfaat [14].

Dalam analisis [15], mereka menguji penambahan bahan isi filler pada 0%, 1%, 2%, dan 3%, dengan lima sampel benda uji masing-masingnya dibuat, sehingga total 20 benda uji diuji dengan tes Marshall. Hasil penelitian menunjukkan kepadatan (density) dan nilai VFB tertinggi pada kadar fly ash 0%, nilai VMA/porositas tertinggi pada kadar 2%, dan nilai kelelahan (flow) pada kadar 0%, 1%, dan 2% memenuhi Fokus penelitian ini adalah bagaimana kadar filler abu terbang batu bara berpengaruh terhadap karakteristik campuran beton aspal, dan bagaimana perubahan kadar filler berdampak pada karakteristik campuran. Jadi, abu batu bara, yang sebelumnya digunakan sebagai bahan buangan, bisa digunakan untuk filler alternatif saat membangun jalan raya [15].

Selain itu, penelitian telah dilakukan [16] dengan variasi pengujian 1%, 1,5%, dan 2%. Penelitian tersebut menemukan bahwa nilai rata-rata untuk Spesifikasi Bina Marga Revisi 3 tahun 2010 adalah variasi 2 persen. Sifat-sifat marshall, seperti densitas, total rongga (daktilitas), stabilitas redaman, stabilitas sisa, dan penurunan nilai permeabilitas (kedap air), dapat diamati ketika fly ash digunakan sebagai bahan pengisi (filler) pada campuran perkerasan jalan laston lapis aus/asphalt concrete wearing course (AC-WC). Selain itu, untuk mengurangi limbah fly ash, campuran beraspal yang ditambahkan dengan fly ash juga dapat dievaluasi [16].

Dengan variasi substitusi 1%, 2%, 3%, dan 4%, penelitian [17] menemukan bahwa campuran aspal memenuhi syarat untuk aspal beton AC-WC yang ditetapkan oleh Spesifikasi Teknis Bina Marga 2018 dalam hal fleksibilitas dan ketahanan. Penempatan Laston langsung di atas lapisan seperti aus (WC-Wearing Course) membuat lapisan ini rentan terhadap panas dan beban lalu lintas. Ini sangat penting untuk mengubah bahan limbah batu bara karena penelitian ini dapat digunakan untuk menggunakan limbah batu bara berlebih yang ada di sekitar kita untuk dicampur dengan aspal dan mengurangi limbah batu bara berlebih [17].

Berdasarkan dari penelitian yang dilakukan oleh yang sebelumnya maka dalam rangka menaikkan nilai guna dan tambah limbah industri, investasi harus dilakukan dalam prosesnya. Sehingga perlu adanya pemanfaatan terhadap bahan tambahan untuk aspal serta mengetahui apakah penambahan bahan ini mempunyai pengaruhnya terhadap aspal dalam meningkatkan karakteristiknya. Maka dari itu penulis memiliki tujuan untuk memanfaatkan Nano Fly Ash sebagai bahan tambah untuk aspal dalam meningkatkan karakteristiknya serta sebagai peningkatan nilai guna dari Fly Ash dengan menggunakan variasi 0%,1%, 2% dan 2,5%.

METODE PENELITIAN

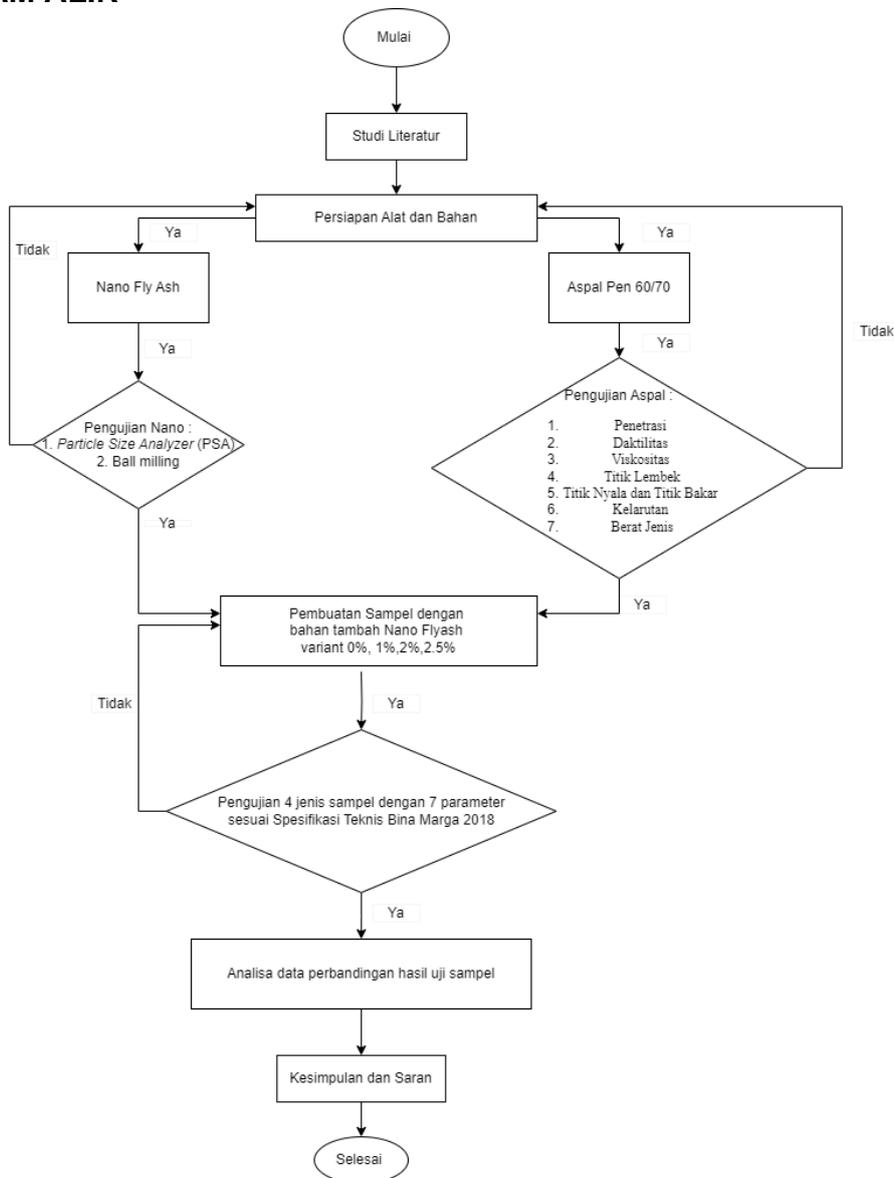
Peneliti melakukan metode eksperimen di Laboratorium Bahan Konstruksi Bina Marga UPTD. Menggunakan nano fly ash sebagai bahan tambahan aspal untuk meningkatkan karakteristiknya merupakan tujuan pada penelitian ini. Dalam penelitian ini menggunakan Standar Pengujian Spesifikasi Bina Marga 2018[8] yang menggunakan metode AASHTO, ASTM, dan SNI. Tahap awal penelitian dimulai dengan mencari referensi studi sebelumnya.

Adapun benda ujinya yaitu Aspal Shell Pen 60/70 yang berada di UPTD Laboratorium Bahan Konstruksi dan Fly Ash Tipe F PT. Paiton yang di suplai dari Kota Blitar. Dengan rencana variasi tambahan yang akan digunakan yaitu sebesar 0%, 1%, 2% dan 2,5%. Dibawah ini merupakan jenis pengujian yang akan dilakukan.

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen 60-70	Tipe II Aspal Modifikasi	
				Elastomer Sintesis	
				PG70	PG76
1.	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70	Dilaporkan	
2.	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis (G^2/\sin^8) pada osilasi 10 rad/detik $\geq 1,0$ kPa (°C)	SNI 06-6442-2000	-	70	60
3.	Viskositas Kinematis 135°C (cSt) ³	ASTM D2170-10	≥ 300	≤ 3000	
4.	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48	Dilaporkan	
5.	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2434:2011	≥ 100	-	
6.	Titik Nyala (°C)	SNI 2434:2011	≥ 232	≥ 230	
7.	Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-14	≥ 99	≥ 99	
8.	Berat Jenis	SNI 2441:1011	$\geq 1,0$	-	
9.	Stabilitas Penyimpanan Perbedaan Titik Lembek (°C)	ASTM D 5976-00 Part 6.1 dan SNI 2434:2011	-	$\leq 2,2$	

Gambar 1 Tabel Pengujian Aspal Pen 60/70 (Spesifikasi Teknis Bina Marga 2018)

DIAGRAM ALIR



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

STUDI LITERATUR

Studi literatur adalah jenis penelitian yang melibatkan meninjau, menganalisis, dan mengumpulkan informasi dari berbagai jenis literatur, seperti buku, jurnal, artikel, laporan penelitian, serta lainnya yang relevan. Tujuan dari studi literatur adalah untuk meningkatkan pemahaman kita tentang ilmu pengetahuan saat ini, menemukan celah dalam penelitian, dan memberikan landasan teori yang kuat untuk penelitian yang akan datang. Peneliti dapat menilai kontribusi penelitian sebelumnya dan membangun argumen berdasarkan data dan fakta saat ini dengan melakukan studi literatur.

DESKRIPSI MATERIAL



Gambar 3. Nano Fly Ash Tipe F (Dokumen Penelitian)

Untuk bahan tambahannya, penelitian ini menggunakan Nano Fly Ash Tipe F karena sifat pozzolannya yang dapat mengisi rongga, meningkatkan kekuatan, dan ketahanan. Menurut [13] Fly Ash kelas F adalah satu-satunya bahan pengganti yang dapat digunakan. Untuk menghasilkan nano fly ash, teknologi nano partikel digunakan. Salah satu alat yang digunakan untuk mengukur ukuran nano partikel dalam satu sampel adalah Partikel Ukuran Analisis (PSA). Alat ini bekerja dengan metode Non-Invasive Back Scatter (NIBS), dan hasil laser 29 HeNe 4 mW melalui panjang gelombang dengan ukuran maksimal 633 nm. Yang dihasilkan berupa kurva pada ukuran partikel kecil, yang penggunaan bentuknya cair dan bubuk memiliki ukuran nm kemudian di distribusikan pada media cair. Setelah proses PSA, langkah berikutnya adalah pengujian ball milling. Ini adalah metode penggilingan bubuk atau bubuk menjadi partikel dan material campuran yang sangat halus. Metode ini memiliki keuntungan karena tidak memerlukan pelarut organik, yang membuatnya mudah digunakan, ramah lingkungan, dan ekonomis. Mereka biasanya terdiri dari cangkang berbentuk silinder berlubang yang diisi dengan bola yang terbuat dari karet, keramik, baja tahan karet, baja tahan karat, atau baja tahan karat. Energi yang dilepaskan oleh bola, bubuk, dan waktu menentukan kinerjanya. Karena bentuknya yang tidak teratur dan lamanya proses penggilingan dan pembersihannya, metode ini memiliki risiko kontaminasi nanomaterial [19].

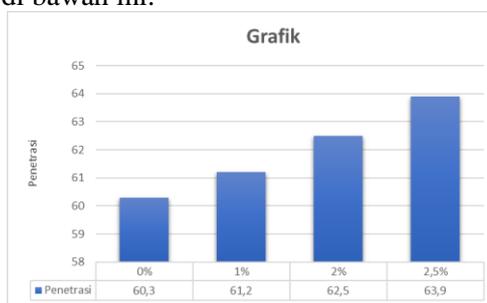
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian karakteristik aspal dengan 7 parameter, yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi UPTD sesuai dengan ketentuan SNI pengujian bahan dan Spesifikasi Teknis Bina Marga 2018. Tabel 2 menunjukkan hasil pemeriksaan keseluruhan untuk mengetahui karakteristik aspal yang ditambahkan Nano Fly Ash serta perbandingan kualitas aspal tanpa Nano Fly Ash. Hasil pemeriksaan karakteristik juga digambarkan dalam sajian grafik.

Pemeriksaan	Metode pengujian	Hasil				Spesifikasi		Satuan
		0%	1%	2%	2.5%	Min	Max	
Penetrasi (25°C selama 1-2 jam)	SNI 2456 - 2011	60,3	61,2	62,5	63,9	60	70	0,1 mm
Titik Lembek (Ring and Ball)	SNI 2434 - 2011	49,0	49,06	50,0	50,4	48	58	°C
Daktilitas (25°C)	SNI 2432 - 2011	> 140	> 140	> 140	> 140	100	-	Cm
Berat jenis (25°C)	SNI 2441 - 2011	1,0332	1,0352	1,0382	1,0484	1	-	Gr/cc
Titik Nyala (Clev, Open Cup)	SNI 2433 - 2011	309	313	315	318	200	-	°C
Kelarutan Aspal	SNI 2438 - 2015	99,9	99,6	98,5	97,987	≥99	-	%
Viskositas (135°C)	SNI 6721 - 2002	399,16	432,5	442,916	453,3	300	-	Cst

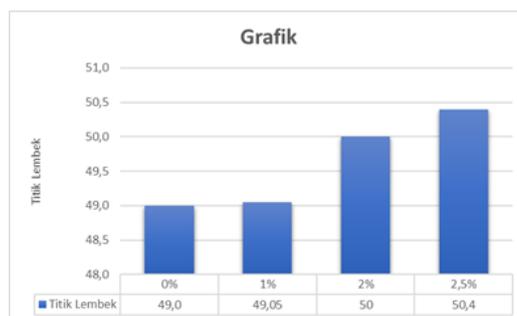
Gambar 4. Tabel Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 (Hasil Pengujian 2024)

Selanjutnya, dalam pengujian pada karakteristik aspal dengan tujuh parameter digambarkan dalam grafik di bawah ini.



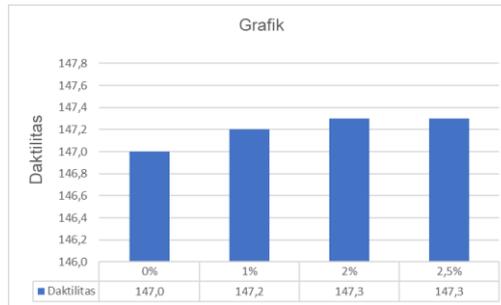
Gambar 5. Grafik Penetrasi (Hasil Pengujian 2024)

Grafik ini merupakan hasil pengujian penetrasi yang berfungsi menentukan kualitas aspal, dimana tiap variasinya meningkat seperti pada variasi 0% yaitu 60.3, variasi 1% yaitu 61.2, variasi 2%, atau 62.5, dan variasi 2,5%, yaitu 63.9. Nilai penetrasi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa ada lebih banyak minyak yang terkandung, yang membuat aspal lebih lembek.



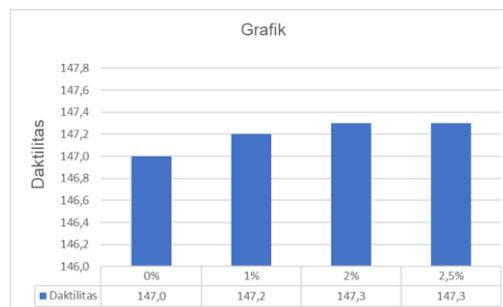
Gambar 6. Grafik Titik Lembek (Hasil Pengujian 2024)

Untuk pengujian Titik Lembek dimana berfungsi untuk menentukan suhu pengikat aspalnya, berdasarkan hasil pengujian Titik Lembek nilai setiap variasinya pada 0% yaitu 49,0, variasi 1% yaitu 49,05, variasi 2% yaitu 50, dan variasi 2,5% yaitu 50.4.



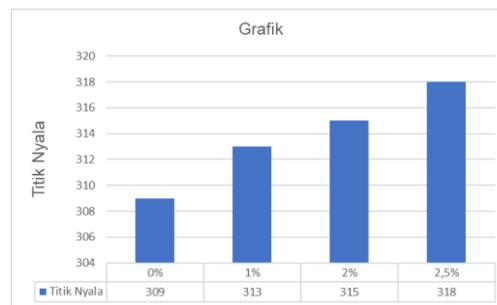
Gambar 7. Grafik Daktalitas (Hasil Pengujian 2024)

Setiap variasi memiliki nilai: 0%, yaitu 147.0; 1%, yaitu 147.2; 2%, yaitu 147.3; dan 2,5%, yaitu 147.3. Hasil tes daktalitas ditunjukkan dalam grafik. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai kelenturan atau elastisitas aspal, yang merupakan karakteristik fisiknya.



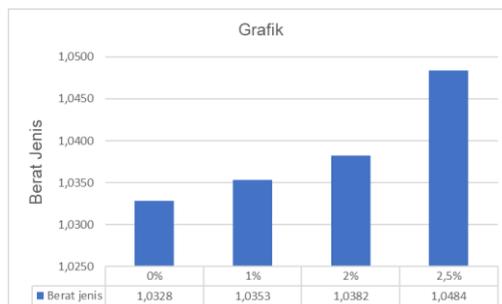
Gambar 8. Grafik Kelarutan (Hasil Pengujian 2024)

Hasil uji kelarutan ditunjukkan dalam grafik berikut: setiap variasi memiliki nilai nol, yaitu 99.856; variasi 1%, yaitu 99.608; variasi 2%, yaitu 98,5; dan variasi 2,5%, yaitu 97.986. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah aspal tercampur dengan baik dan apakah ada bahan lain di dalamnya atau tidak.



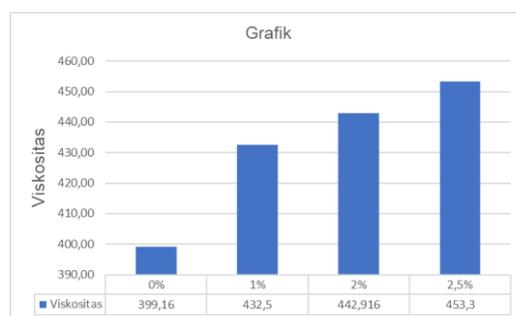
Gambar 9. Grafik Titik Nyala (Hasil Pengujian 2024)

Gambar berikut menunjukkan hasil pengujian Titik Nyala: 0%, 309, 1%, 313, 2%, 315, dan 2,5% 318. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan suhu tertinggi yang dapat digunakan untuk memanaskan aspal agar tidak terbakar saat dipanaskan.



Gambar 10. Grafik Berat Jenis (Hasil Pengujian 2024)

Hasil uji berat jenis menunjukkan nilai 0%, yaitu 1.0328; variasi 1%, yaitu 1.0353; variasi 2%, yaitu 1.0382; dan variasi 2,5%, yaitu 1.0484. Dalam pengujian ini, sifat fisik aspal diperiksa, untuk mengetahui kekuatan aspal.



Gambar 11. Grafik Viskositas (Hasil Pengujian 2024)

Hasil pengujian viskositas, yang disajikan dalam grafik, menunjukkan nilai 0%, yaitu 399.16; variasi 1%, yaitu 4325; variasi 2%, yaitu 442.916; dan variasi 2,5%, yaitu 453.3. Tujuan dari pengujian viskositas yaitu untuk mengetahui kekentalan aspal.

Di pengujian [14] menunjukkan bahwa dengan menambah batu bara Fly Ash sebesar 2%, campuran aspal dapat memenuhi spesifikasi teknis untuk Jalan Bebas Hambatan dan Jalan Tol pada tahun 2020. Hasil ini tidak hanya menawarkan solusi untuk meningkatkan kualitas material jalan tetapi juga menawarkan metode yang lebih baik untuk memanfaatkan limbah industri, yang dapat menghasilkan pengelolaan lingkungan yang lebih baik. Kesuksesan penambahan Fly Ash dalam proporsi 2% ini menunjukkan bahwa metode ini memiliki potensi besar untuk digunakan dalam proyek infrastruktur jalan yang akan datang. Penggunaan fly ash tidak hanya meningkatkan kualitas aspal, tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dari limbah batu bara.

Studi [15] menemukan hasil yang menguntungkan tentang penggunaan fly ash sebagai bahan pengisi pada campuran beraspal beton. Dimana variasi pengujiannya 1%, 1,5%, dan 2%, penelitian ini menemukan bahwa Menurut penelitian ini, fly ash dapat digunakan sebagai pengisi alternatif yang dapat meningkatkan kualitas aspal terutama pada persentase 2% hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan fly ash pada Tingkat ini memberikan peningkatan performa yang signifikan. Penelitian ini mendukung potensi fly ash sebagai alternatif bahan pengisi yang dapat meningkatkan kualitas aspal beton, sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri.

Penelitian [16] membahas berbagai karakteristik campuran aspal yang dipengaruhi oleh fly ash. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat-sifat material secara signifikan diubah oleh penambahan fly ash pada kadar yang berbeda. Menurut Spesifikasi Teknik Bina Marga 2010, padatan (density) dan nilai VFB tertinggi dicapai pada variasi fly ash 0%. VMA atau porositas

tertinggi adalah 2%, dan nilai Marshall Quotient (MQ) optimal adalah 1%. Nilai kelelahan (flow) juga memenuhi spesifikasi pada kadar 0%, 1%, dan 2%. Hasilnya menunjukkan bahwa fly ash bisa digunakan untuk bahan dalam meningkatkan kualitas campuran aspal.

Penelitian [17] dengan variasi substitusi 1%, 2%, 3%, dan 4%, penelitian menunjukkan bahwa dengan variasi bottom ash 1%, campuran aspal memenuhi syarat untuk durabilitas dan fleksibilitas aspal beton AC-WC pada Spesifikasi Teknis Bina Marga 2018 serta memberikan pemanfaatan bottom ash dapat menjadi Solusi berkelanjutan dalam pengelolaan limbah batu bara sekaligus meningkatkan performa material perkerasan jalan.

Penelitian sebelumnya dan penelitian ini menunjukkan bahwa fly ash dapat ditambahkan ke dalam campuran aspal serta dapat dijadikan sebagai bahan tambah pada aspal dan dapat meningkatkan karakteristik material aspal, terutama stabilitas dan kekuatan. Oleh karena itu, nano fly ash diharapkan dapat meningkatkan sifat-sifat material aspal, terutama dalam hal performa jangka panjang. Oleh karena itu, penggunaan nano fly ash dalam penelitian lanjutan adalah keputusan yang dapat ditingkatkan kegunaannya.

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penambahan Nano Fly Ash sebagai bahan tambahan pada aspal memberikan dampak yang positif terhadap karakteristik aspal pen 60/70 tanpa mempengaruhi suhu selama proses pencampuran. Pada tahap awal pengambilan sampel aspal, ditemukan bahwa aspal harus dipanaskan pada suhu 120°–130°C untuk menjaga viskositasnya tetap optimal, sehingga tidak terlalu cair atau terlalu padat. Penting untuk menjaga suhu ini agar proses pencampuran dengan Nano Fly Ash berjalan dengan baik.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan Nano Fly Ash tidak memerlukan peningkatan suhu, tetapi secara signifikan mampu meningkatkan kualitas aspal, khususnya dalam hal kekuatan dan daya tahan. Hal ini mengindikasikan bahwa Nano Fly Ash mampu memperbaiki sifat mekanik aspal, yang menjadikannya lebih tahan lama dan cocok untuk digunakan pada infrastruktur jalan.

Selain itu, penggunaan Nano Fly Ash sebagai bahan tambahan memiliki dampak positif lainnya dalam hal keberlanjutan lingkungan. Limbah Fly Ash yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dapat dimanfaatkan secara efektif, sehingga mengurangi jumlah limbah yang berpotensi mencemari lingkungan. Penggunaan Fly Ash juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan tambahan yang lebih konvensional, yang umumnya memiliki biaya lebih tinggi dan berdampak lebih besar terhadap lingkungan.

Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa Nano Fly Ash tidak hanya memberikan peningkatan kualitas pada material perkerasan jalan, tetapi juga memberikan kontribusi penting terhadap upaya keberlanjutan di bidang konstruksi, terutama dalam mengurangi limbah industri dan meningkatkan efisiensi penggunaan material. Hal ini menjadikan Nano Fly Ash sebagai alternatif yang potensial dalam industri perkerasan jalan masa depan.

KESIMPULAN

Serangkaian pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa hasilnya adalah sebagai berikut:

1. Hasil pengujian menunjukkan variasi 1% pada penambahan bahan tambah Nano Fly Ash pada Aspal Pen 60/70, dengan 7 parameter terbaik juga masuk dalam Spesifikasi Teknis Bina Marga 2018.
2. Hasil pengujian menghasilkan bahwa variasi 2% dan 2,5%, dengan hanya 6 parameter yang sesuai dengan Spesifikasi Teknis Bina Marga 2018 hasil dari kedua variasi tersebut tidak melampaui spesifikasi yaitu ≥ 99 .

Dengan adanya perbedaan antara aspal tanpa bahan tambah dengan menggunakan bahan tambah dapat menjadikan nilai peningkatan karakteristik pada Aspal Pen 60/70, maka Nano Fly Ash bisa dijadikan sebagai bahan tambah. Rekomendasi penelitian ini penambahan Nano Fly Ash sebagai bahan tambah pada Aspal Pen 60/70 disarankan memakai variasi 1% karena dilihat dari rata-rata pengujian parameter karakteristik nya

SARAN

Perlu diadakannya kajian nilai ekonomis sehingga bisa mendapatkan gambaran apabila dilaksanakan pada skala yang sebenarnya. Dapat dilakukan penelitian berlanjut dengan persentase variasi yang lebih besar supaya bisa mendapatkan hasil perbedaan yang lebih signifikan. Serta penelitian ini perlu dikaji lebih lanjut untuk ke tahap pencampuran aspal agar lebih terlihat ke efektifan penggunaan bahan tambah Nano Fly Ash nya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini kami selaku penulis mengucapkan terima kasih untuk Dr. Siegfried Syafier, IR., M.Sc., dosen pembimbing, atas bimbingan, pengetahuan, dan bantuan yang tak ternilai yang beliau berikan selama proses penelitian ini. Sangat penting bagi kami untuk menyelesaikan penelitian ini bahwa Anda telah memberikan bimbingan dan saran.

Selain itu, penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada kedua orang tua atas doa mereka, bantuan moral, serta kasih sayang yang tiada habisnya yang sangat membantu dalam pencapaian ini. Penulis sangat berterima kasih atas semua usaha yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standar Nasional Indonesia, "Cara Uji Penetrasi Aspal," SNI 2456:2011, 2011, pp. 1–17.
- [2] Badan Standardisasi Nasional, "Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)," SNI 2434:2011, 2011, pp. 1–11.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, "Cara uji daktilitas aspal," SNI 2432:2011, 2011.
- [4] Badan Standardisasi Nasional, "Cara Uji Kelarutan Aspal," SNI 2438:2015, Jakarta, 2015, pp. 1–13.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, "Cara Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal dengan Alat Cleveland Open Up," SNI 2433:2011, 2011, pp. 1–18.
- [6] Badan Standardisasi Nasional, "BJ ASPALSNI 2441-2011.pdf," n.d.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, "Cara Uji Viskositas Aspal pada Temperatur Tinggi dengan Alat Saybolt Furol," SNI 7729:2011, Jakarta, 2011.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, "SPEKTEKNIS 2018 BAB 6.pdf," n.d.
- [9] I. Hamirhan, *Konstruksi Jalan Raya Buku 2 Perencanaan Perkerasan Jalan Eaya*, Nova Bandung, 2005.
- [10] I. Soehartono, *Teknologi Aspal dan Penggunaannya*, Yogyakarta: CV. Andi, 2015.
- [11] S. Alamsyah, L. Basri, and A. Alifuddin, "Konsep Design Mix Formula (DMF) Lapis Tipis Beton Aspal (LTBA) Mengacu Spesifikasi Umum 2018 Bina Marga Terhadap

Sifat-Sifat (ITS) dan Deformasi," *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, vol. 5, no. 2, pp. 158–169, 2020, doi: 10.33096/jtسم.v5i2.87.

[12] S. Fitri, S. M. Saleh, and M. Isya, "Pengaruh Penambahan Limbah Plastik Kresek sebagai Substitusi Aspal Pen 60/70," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 1, pp. 737–748, 2018.

[13] S. Subakti, "Perancangan Interior Pusat Edukasi Mitigasi Bencana di Yogyakarta," *Perancangan Interior Pusat Mitigasi di Jogja*, vol. 27, no. 1989, pp. 6–23, 2014.

[14] D. Rachman, S. Riwayati, D. R. Sirait, and M. Arfan, "Penambahan Fly Ash Batu Bara Pltu Sebagai Filler Aspal Ac Wc," *Bearing: Jurnal Penelitian Dan Kajian Teknik Sipil*, vol. 7, no. 4, p. 207, 2022, doi: 10.32502/jbearing.v7i4.5497.

[15] S. Suriyanti and I. Agus, "Analisis Pengaruh Fly Ash sebagai Filler pada Campuran Hot Mix Asphalt untuk Lapis Perkerasan AC-Base," *Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil UNIDAYAN*, vol. 9, no. 2, pp. 83–88, 2020, doi: 10.55340/jmi.v9i2.657.

[16] A. U. Al Qurny, H. Puspito, I. Imam, and N. Tinumbia, "Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi (Filler) Fly Ash terhadap Campuran Aspal Beton Lapis Aus (Asphalt Concrete Wearing Course/AC-WC)," *Jurnal ARTESIS*, vol. 2, no. 1, pp. 87–97, 2022, doi: 10.35814/artesis.v2i1.3766.

[17] F. Rosyad and N. T. Andini, "Analisis Pemanfaatan Limbah Batu Bara Bottom Ash Sebagai Filler Terhadap Durabilitas dan Flexibilitas Aspal Beton AC-WC," vol. 6, no. 3, pp. 1–23, 2024.

[18] D. R. Basria, P. Ningrum, and A. Akram, "Analisis Pengaruh Penggunaan Fly Ash Batu Bara Dan Abu Batu Sebagai Filler Pada Campuran Laston Lapis Aus (AC-WC)," vol. 1, 2024.

[19] N. P. Trisnayanti, "Metode sintesis nanopartikel," *Universitas Indonesia*, vol. 3, pp. 1–4, 2020.